

## 자연순환형 소형 진공증발농축장치 시뮬레이션

박지훈, 김내현<sup>†</sup>, 최용민, 오왕규

<sup>†</sup> 인천대학교 기계공학과

### Simulation of a natural circulation evaporative concentrator

Ji-Hoon Park, Nae-Hyun Kim<sup>†</sup>, Young-Min Choi, Wang-Kyu Oh

<sup>†</sup> Department of Mechanical Engineering, University of Incheon

**ABSTRACT:** In this study, an analysis was performed on an evaporative steam generator (concentrator), where natural circulation convective boiling occurs on tube-side by condensing hot steam on shell-side. Existing correlations on two-phase pressure drop, boiling or condensation heat transfer were used for the analysis. The effect of number of tubes, tube length, etc. on thermal performance was investigated. Simulation results reveal that steam generation rate increases almost proportionally to the tube length, or number of tubes. It is also shown that water circulation rate decreases as tube length increases.

**Key words:** Natural circulation(자연순환), Vacuum(진공), Vaporization(증발), concentrator(농축장치), Simulation(시뮬레이션)

#### 1. 개요

21세기에 들어서면서 환경에 대한 국민적 관심이 고조되면서 정부의 환경오염방지에 대한 정책도 강화되었다. 이에 따라 산업폐수처리에 대한 산업계의 경각심도 높아져서 단속에 의한 벌금 등 형사 처벌을 받고 폐수에 대한 처리조치를 취하기보다 아예 처음부터 제대로 처리를 해야 한다는 인식이 널리 확산되고, 동시에 모든 산업이 경쟁력을 강화해 가지 않으면 살아남기 힘든 현실에서 원가절감에 대한 욕구도 대단히 높은 상황이다. 이러한 시점에 독성이 강하고 유해한 산업폐수의 양을 줄이는 것과 재활용의 방법을 찾는 것은 매우 중요한 과제라 할 수 있다. 산업폐수를 줄이는 한가지 방안으로 폐수를 진공증발에 의해 농축시키는 방법이 있다. Fig. 1에 진공증발 순환농축시스템의 개략도가 나타나 있다. 본 시스템은 batch형으로 운전된다. 일정량

의 폐수는 폐수 유입관(1)을 통하여 증발농축 시스템으로 유입되며 내부 열교환기(2)를 통과하게 된다. 이때 폐수는 배출되는 응축액(120°C)의 현열을 흡수하여 증발점(85°C) 근처까지 온도가 올라간다. 유입된 폐수는 증발농축부에서 증발하게 된다. 증발농축부는 수직 셸-튜브형 열교환기로 관내측으로 폐수가 흐르며 관외측에서 응축하는 수증기(120°C)에 의해 증발한다. 증발한 수증기는 기액분리기(4)를 지난 다음 압축기(5)에 의해 고온(120°C)으로 압축된 후 증발농축부의 셸측(6)에 공급된다. 셸측의 수증기는 응축하며 관내측의 폐수를 증발시킨다. 이러한 과정을 통하여 폐수는 연속적으로 농축된다. 증발농축부는 수직관 열교환기로, 중앙에 직경이 큰 원관이 배치되고 그 주위로 직경이 작은 원관들이 원주방향으로 다수 배치된다. Fig. 2에 증발농축부의 개략도를 나타내었다. 작은 원관에서는 관 외측의 수증기 응축열로 관 내측의 폐수가 증발된다. 이 중 수증기는 상부의 기액분리기로 가고 폐수는 중앙에 위치한 직경이 큰 원관을 통하여 하부로 유출된다. 이 폐수는 다시 작은 관을 통하여 상승하며 증발이 일어난다. 즉, 주위의 작은 관과 중앙의

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-32-770-8420; fax: +82-32-770-8410

E-mail address: knh0001@incheon.ac.kr

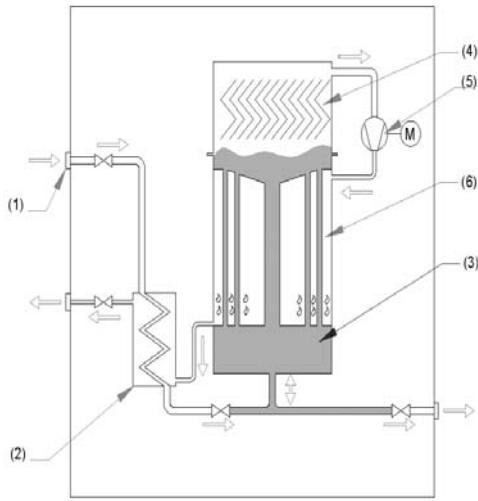


Fig. 1 Schematic drawing of the waste water concentration system.

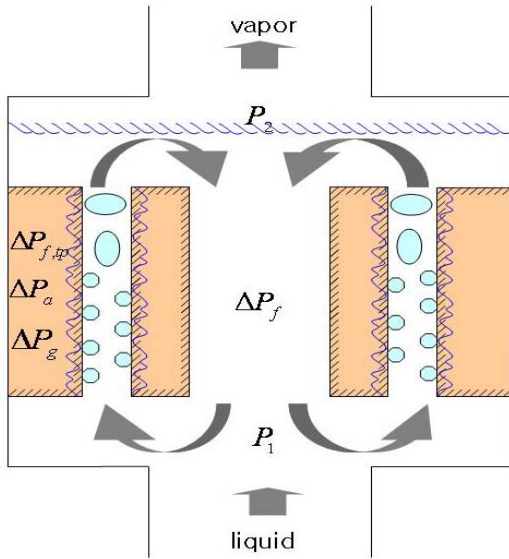


Fig. 2 Schematic drawing of the concentration heat exchanger

큰 관을 통하여 자연순환 유동을 형성하며 폐수를 농축하게 되는데 관의 직경, 길이, 증발 및 응축온도등이 농축과정에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 관내측의 2상유동 및 열전달, 관 외측의 응축 열전달, 자연순환 유동 해석 등을 통하여 증발농축부 시물레이션 프로그램을 개발하고, 이를 이용하여 관의 길이, 개수등 증발농축부의 기하학적 형상이 농축량, 농축 시간등에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2. 자연순환 유동 해석

증발농축부의 작은 관에서는 관벽에서 기포가 발생하면서 관 내에서는 2상 유동이 형성된다. 기포의 양은 관 상부로 갈수록 증가하므로 마찰손실도 증가한다. 따라서 정밀한 압력손실 계산을 위해서는 전열관을 미소체적으로 나누어 계산할 필요가 있다. 2상 유동의 경우 압력손실은 마찰항과 가속항 그리고 중력항으로 구성된다<sup>(1)</sup>.

$$-\frac{dP}{dz} = -\frac{dP}{dz_f} - \frac{dP}{dz_a} - \frac{dP}{dz_z} \quad (1)$$

압력변화에 따른 기체의 체적변화 ( $dv_g/dP$ )가 크지 않은 경우 각 항은 다음과 같이 정리된다. 여기서 2상유동은 편의상 균질유동으로 가정하였다.

$$-\frac{dP}{dz_f} = \frac{2f_{TP}G^2v_f}{D} [1 + (\frac{v_{fg}}{v_f})x] \quad (2)$$

$$-\frac{dP}{dz_a} = G^2v_f(\frac{v_{fg}}{v_f})\frac{dx}{dz} \quad (3)$$

$$-\frac{dP}{dz_z} = \frac{g}{v_f[1 + x(v_{fg}/v_f)]} \quad (4)$$

중앙에 위치한 직경이 큰 하강관의 경우 압력 손실은 액체유동의 마찰항과 중력항으로 구성된다.

$$-\frac{dP}{dz} = -\frac{dP}{dz_{fc}} - \frac{dP}{dz_{zc}} \quad (5)$$

$$-\frac{dP}{dz_{fc}} = -\frac{2fG_c^2v_f}{D_c} \quad (6)$$

$$-\frac{dP}{dz_{zc}} = \frac{g}{v_f} \quad (7)$$

상승관 출구의 압력과 하강관 입구의 압력이 같아야 하므로 식 (8)을 만족하는 조건에서 순환유동이 결정된다.

$$-\frac{dP}{dz_f} - \frac{dP}{dz_a} - \frac{dP}{dz_z} + \frac{dP}{dz_{fc}} + \frac{dP}{dz_{zc}} = 0 \quad (8)$$

식(1)의  $f_{TP}$  는 2상유동의 마찰계수로 균질유동

을 가정하면 아래와 같다 [1]. 또한 식 (6)의 단상류 마찰계수  $f$  는 식 (11)로 구한다.

$$f_{TP} = 0.079 \left( \frac{GD}{\mu} \right)^{-0.25} \quad (9)$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{1-x}{\mu_f} \quad (10)$$

$$f = 0.079 \left( \frac{G_c D_c}{\mu_f} \right)^{-0.25} \quad (11)$$

$$h_i = 0.023 Re_i^{0.8} Pr_i^{0.4} \frac{k_f}{D} \quad (18)$$

$$Re_i = \frac{G(1-x)D}{\mu_f} \quad (19)$$

$$E = (1 + X_{tt}^{-0.5})^{1.78} \left( \frac{Pr_i + 1}{2} \right)^{0.444} \quad (20)$$

$$X_{tt} = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.5} \left( \frac{\mu_f}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad (21)$$

### 3. 증발농축부 열전달 해석

증발 농축부에서는 관 외측에서 수증기의 응축이 일어나고 이 응축열이 관 내로 전달되어 폐수의 증발이 일어난다. 응축 열전달계수는 관 하부로 갈수록 액막이 두꺼워지므로 감소한다. 반면에 증발 열전달계수는 관 상부로 갈수록 증기 건도 증가에 따른 유속의 증가로 증가한다. 따라서 정밀한 계산을 위해서는 전열관을 미소체적으로 나누어 계산할 필요가 있다. 수직관 응축 열전달계수는 Nusselt의 해석 [2]으로부터 구할 수 있다.

$$Nu = \frac{h_o L}{k_f} = 0.707 \left[ \frac{\rho_f g (\rho_f - \rho_g) h_{fg}' L^3}{\mu_f k_f (T_{sat} - T_{wo})} \right]^{1/4} \quad (12)$$

$$h_{fg}' = h_{fg} + 0.68 c_{pf} (T_{sat} - T_{wo}) \quad (13)$$

관 내 증발 열전달계수의 계산에는 Chen [3]의 상관식을 사용한다.

$$h_i = h_{NB} + h_c \quad (14)$$

$$h_{NB} = \frac{0.00122 k_f^{0.79} c_{pf}^{0.45} \rho_f^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_f^{0.29} h_{fg}^{0.24} \rho_g^{0.24}} \Delta T_{sat}^{0.24} \Delta P_{sat}^{0.75} S \quad (15)$$

$$S = 0.9622 - \tan^{-1} \left( \frac{Re_i E^{1.25}}{6.18 \times 10^4} \right) \quad (16)$$

$$h_c = h_i E \quad (17)$$

### 4. 시뮬레이션 프로그램의 구성

Fig. 3에 프로그램 흐름도를 나타내었다. 프로그램의 목적은 주어진 제원과 운전조건의 증발농축부에서 시간당 얼마나 농축시킬 수 있는지 (또는 수증기를 얼마나 발생시킬 수 있는지)를 계산하는 것이다.

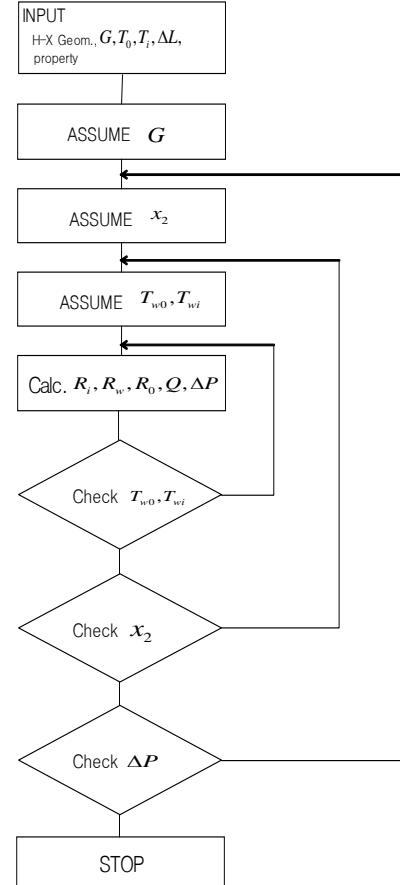


Fig. 3 Program flow diagram

이를 위하여 관 직경, 길이등과 같은 증발농축부의 제원과 증발온도, 응축온도가 주어진다. 우선은 미소체적(수직관의 미소길이)을 가정하고 이 미소체적의 전열량을 계산한다. 전열관을 중심으로 응축과 증발이 일어나므로 미소체적의 전열량은 다음과 같다.

$$dQ = U dA (T_o - T_i) \quad (22)$$

$$\frac{1}{U dA} = \frac{1}{h_o dA_o} + \frac{t}{k dA_m} + \frac{1}{h_i dA_i} \quad (23)$$

식 (23)에서 증발 및 응축 열전달계수  $h_i, h_o$ 는 전 절의 상관식을 사용하여 구한다. 그런데 증발 열전달계수는 질량유속, 건도와 벽면온도에 따라 값이 달라지고 응축열전달계수도 벽면온도의 함수이다. 따라서 우선은 건도와 벽면온도를 가정하고 추후에 이를 확인하여 반복계산을 수행한다. 벽면온도는 식 (23)의 저항비로부터 아래 관계식이 만족되어야 한다.

$$\frac{T_o - T_{wo}}{T_o - T_i} = \frac{U dA}{h_o dA_o} \quad (24)$$

$$\frac{T_{wi} - T_i}{T_o - T_i} = \frac{U dA}{h_i dA_i} \quad (25)$$

또한 건도는 다음 관계식이 만족되어야 한다.

$$dQ = \dot{m} \Delta x = U dA (T_o - T_i) \quad (26)$$

초기 미소체적에 대해 전열량 및 출구 건도 계산이 완료되면 출구건도를 다음 미소체적의 입구건도로 하여 계산을 반복한다. 이와 동시에 각 미소체적에서의 압력손실들도 계산한다. 전체 전열관에 대해 계산이 끝나면 식 (8)의 압력손실 균형을 만족하는지 확인한다. 만족하지 않으면 질량유속을 조절하여 처음부터 계산을 다시 수행한다.

## 5. 시뮬레이션 결과 및 논의

소구경 증발관으로는 외경 19 mm, 관벽 두께

1 mm의 스테인레스관을 사용하고 큰 직경의 하강관으로는 내경 282 mm의 스테인레스 관을 사용하는 것을 가정하였다. 또한 증발온도는 85°C, 응축온도는 120°C로 가정하였다. 시뮬레이션은 증발관의 개수와 전열관의 길이를 변수로 수행되었다. 우선은 관 길이 645 mm, 관 개수 28개를 기본으로 계산하였다.

Fig. 4에 관의 하부로 부터 길이 방향으로 증발 및 응축 열전달계수 변화를 나타내었다. 증발 열전달계수  $h_o$ 는 길이 방향으로 증가함을 보여준다. 이는 증발이 진행됨에 따라 유속이 증가하고 따라서 대류 효과가 부가되기 때문이다. 응축 열전달계수  $h_i$ 도 길이 방향으로 다소 증가한다. 이는 관 상부로 갈수록 액막의 두께가 얇아지기 때문이다. Fig. 4는 증발열전달계수가 응축열전달계수보다 현저히 큼을 보여준다. Fig. 5에는 증기 건도의 변화가 나타나 있다. 증기 건도는 거의 선형적으로 증가하여 출구에서 0.03 정도가 됨을 보여준다.

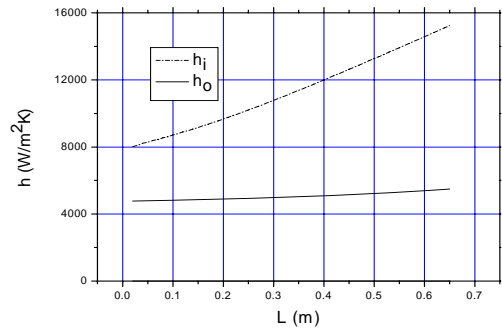


Fig. 4 Evaporation and condensation heat transfer coefficient along tube length

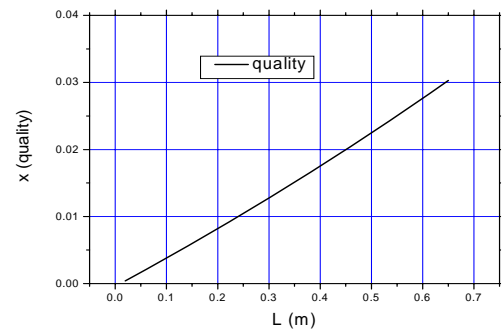


Fig. 5 Vapor quality change along tube length

Fig. 6~8에는 관의 개수를 28개로 고정하고 관의 길이를 변화시킨 결과가 나타나 있다. Fig. 6에는 질량유속의 변화를 나타내었는데 관의 길이가 길어지면 질량유속이 감소함을 보인다. 이는 관의 길이가 길어질수록 2상유동의 마찰항이 증가하기 때문이다. Fig. 7에는 관 출구의 건도가 나타나 있다. 관이 길어지면 전열량이 증가하여 출구건도가 증가함을 알 수 있다. Fig. 8에는 수증기 발생량을 나타내었다. 수증기 발생량은 관의 길이에 거의 선형적으로 비례함을 보여준다. Fig. 9에는 관의 개수 변화에 따른 수증기 발생량의 변화를 나타내었다. 이 때 관의 길이는 0.5 m로 고정하였다. 수증기 발생량은 관의 개수와 거의 선형적으로 비례함을 보여준다.

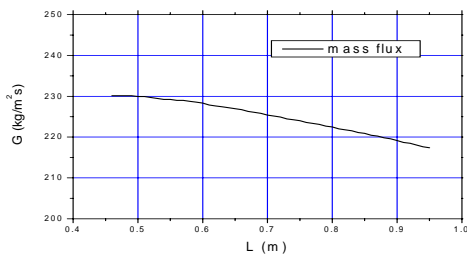


Fig. 6 Change of mass flux for different tube lengths

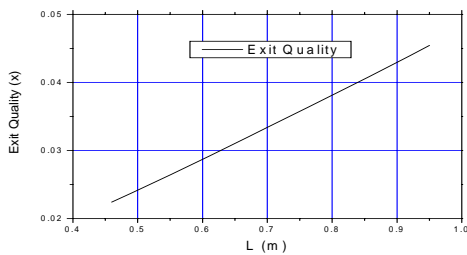


Fig. 7 Change of exit quality for different tube length

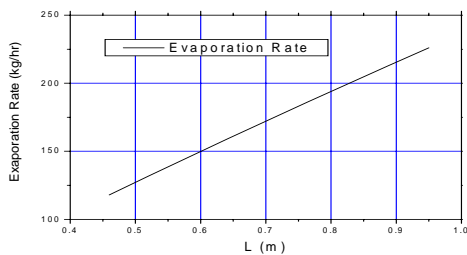


Fig. 8 Change of evaporation rate for different tube length

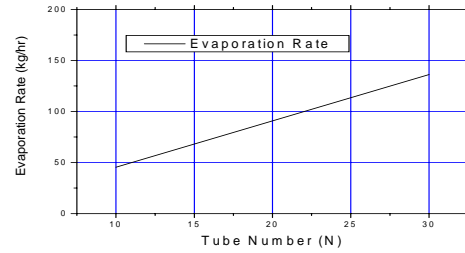


Fig. 9 Change of evaporation rate for different tube number

## 6. 결론

본 연구에서는 자연순환형 증발농축기에 대한 해석을 수행하고 이를 바탕으로 미소체적 기반 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 또한 프로그램을 활용하여 관의 길이, 개수등과 같은 설계변수가 장치의 성능에 미치는 영향을 검토하였다. 시뮬레이션 결과 수증기 발생량은 관의 길이와 개수에 거의 선형적으로 변하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 길이가 길어지면 출구 건도는 증가하지만 순환량은 감소하는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. Collier, J. G. and Thome, J. R., 1996, Convective boiling and condensation, 3rd edition, Clarendon Press, Oxford.
2. Nusselt, W., 1916, Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes, Zeitschr. Ver. Deutsch. Ing., Vol. 60, pp. 541~569.
3. Chen, J. C., 1963, A correlation for boiling heat transfer in convective flow, ASME, 63-HT-34, 6th NHTC, Boston.